

MUSIC 알고리즘 기반 드론 신호의 DoA 추정 시스템 구현

조유겸, 황태욱, 이지원, 백채희, 김정창

국립한국해양대학교

bamppy12@g.kmou.ac.kr, xodnr1130@g.kmou.ac.kr, zzib0808@g.kmou.ac.kr,
ggamsoon2504@g.kmou.ac.kr, jchkim@kmou.ac.kr

Implementation of a DoA Estimation System for Drone Signals Based on MUSIC Algorithm

YuGyeom Cho, Taeuk Hwang, Jiwon Lee, ChaeHui Back, Jeongchang Kim

Korea Maritime & Ocean University

요 약

본 논문은 대표적인 도래각(DoA, Direction of Arrival) 추정 알고리즘인 MUSIC(Multiple Signal Classification)을 이용하여 DJI사의 상용 드론 통신 프로토콜인 OcuSync 신호의 방향을 탐지하는 시스템을 구현하였다. 가상 OcuSync 신호를 이용한 시뮬레이션 결과와 실제 드론으로부터 수신한 실측 신호를 비교 분석하였다.

I. 서론

최근 드론 기술이 급격히 발전하며 다양한 산업 분야에서 긍정적으로 활용되고 있다. 그러나 기술의 보편화는 주요 시설에 대한 보안 위협과 같은 역기능을 야기하기도 한다. 이러한 배경에서 허가되지 않은 드론을 신속히 탐지하고 식별하는 안티드론(C-UAS) 기술의 중요성이 증대되고 있다[1].

이에 본 논문에서는 신호의 도래각(DoA, Direction of Arrival)을 정밀하게 추정할 수 있는 MUSIC 알고리즘을 기반으로 가상으로 생성한 OcuSync 신호에서 DoA를 추정한 결과와 실제 DJI 드론의 사용 환경에서 수집한 실측 신호로부터 DoA를 추정한 결과를 분석한다.

II. 본론

먼저 M 개의 안테나로 구성된 배열 안테나에서 수신된 신호 행렬 $\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{M \times L}$ 를 수식 (1)과 같이 모델링한다.

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S} + \mathbf{N} \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{M \times K}$, $\mathbf{S} \in \mathbb{C}^{K \times L}$, $\mathbf{N} \in \mathbb{C}^{M \times L}$ 은 각각 조향 행렬, 원신호 행렬, 잡음 행렬을 의미하며 M , K , L 은 각각 안테나, 신호원, 스냅샷의 개수를 나타낸다. 조향 행렬 \mathbf{A} 는 각 신호원의 방향 정보를 담고 있는 조향 벡터 $\mathbf{a}(\theta)$ 로 구성된다. 균일 선형 배열 환경에서 특정 각도 θ 에 대한 조향 벡터는 수식 (2)와 같이 정의된다.

$$\mathbf{a}(\theta) = \left[1, e^{-j2\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta}, \dots, e^{-j2\pi \frac{(M-1)d}{\lambda} \sin \theta} \right]^T \quad (2)$$

여기서 d 는 안테나 간 간격, λ 는 수신 신호의 파장을 의미한다.

MUSIC 알고리즘은 수신 신호의 공분산 행렬을 고유값 분해하여 얻은 잡음 부공간(E_n)과 조향 벡터($\mathbf{a}(\theta)$) 사이의 직교성을 이용하며 다음과 같이 공간 스펙트럼 $P_M(\theta)$ 을 수식 (3)과 같이 산출한다.

$$P_M(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}(\theta)^H E_n E_n^H \mathbf{a}(\theta)} \quad (3)$$

잡음 부공간은 배열로 수신한 신호의 실제 도래각에 해당하는 조향 벡터와 서로 직교하는 특성을 지닌다. 따라서 탐색 각도 θ 가 실제 신호의 입사각과 일치할 경우 수식 (3)의 분모 값이 0에 수렴하여 공간 스펙트럼의 값이 최대가 된다. 이런 원리를 이용해 공간 스펙트럼의 첨두값을 계산하여 실제 신호의 도래각을 추정할 수 있다[2].

MUSIC 알고리즘을 이용하여 드론 신호의 도래각 추정 성능을 검증하기 위해 드론 신호 중 하나인 OcuSync에 대한 가상의 신호원을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 신호원은 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식을 기반으로 실제 OcuSync 신호와 유사한 통계적 특성을 갖도록 모델링하였다. 수신기는 5.8 GHz 중심 주파수에 맞춰 반파장($\lambda/2$) 간격으로 이격된 2채널 균일 선형 배열로 가정하였으며, 채널에는 백색 가우시안 잡음을 추가하여 SNR(신호 대 잡음비)을 조절할 수 있도록 설계하였다. 도래각 탐색 범위는 $[-90^\circ, +90^\circ]$ 로 0.5° 간격으로 각도를 탐색하도록 설정하였다. 시뮬레이션에 사용된 주요 파라미터는 다음과 같다. 중심 주파수는 5.8GHz, 사용한 안테나 개수는 2개이고 안테나 간 간격은 2.5cm로 설정하였다. 신호원 개수는 1개이며 실제

입사각(DoA)은 45도로 설정하였다.

그림 1은 SNR 변화에 따른 DoA 추정 성공률을 정량적으로 나타낸 그래프이다. X축은 -20 dB부터 10 dB까지 변화시킨 SNR 값을, Y축은 각 SNR 환경에서 100회의 독립 시행 중, 추정 DoA가 허용 오차범위 ± 0.5 이내일 확률이다.

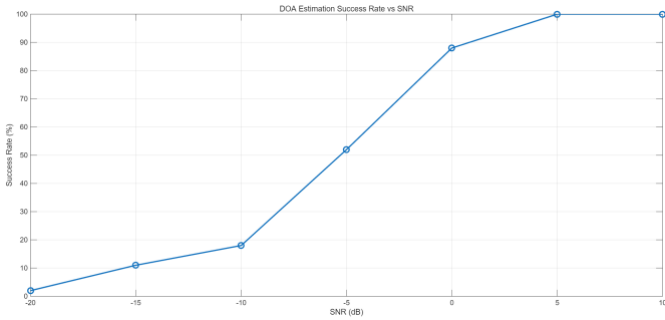


그림 1. SNR 변화에 따른 DoA 추정 성공률 그래프

그래프 분석 결과, SNR이 -15 dB 이하인 낮은 구간에서는 성공률이 5% 이하로 저조하게 나타났고, SNR이 -10 dB에서 0 dB로 증가하는 구간부터 성능이 향상되는 것을 확인하였다.

시뮬레이션을 통해 검증된 알고리즘의 실제 적용성을 평가하기 위해 주변 신호 간섭 및 다중 경로 반사파의 영향을 최소화 할 수 있는 건물 옥상에서 DoA 추정 실험을 진행하였다. 시뮬레이션과 동일한 5.8GHz 대역의 OcuSync 신호를 얻기 위해 실제 DJI Mini 3 드론을 사용하였고 수신 시스템은 2개의 안테나 소자를 사용하는 균일 선형 배열 구성을 구현하기 위해 USRP B210과 2개의 무지향성 안테나로 구성하였다. 이때 안테나 간 간격은 5.8GHz 중심 주파수의 반파장에 해당하는 약 2.58cm로 설정하여 시뮬레이션 조건과 일치시켰다.

정확한 측정을 위해 안테나 배열을 고정한 후, 배열 정면을 기준으로 45° 방향에 드론을 위치시켜서 OcuSync 신호의 I/Q 데이터를 확보하였다. 그림 2는 2개의 안테나로부터 수집된 신호의 스펙트로그램을 나타낸다.

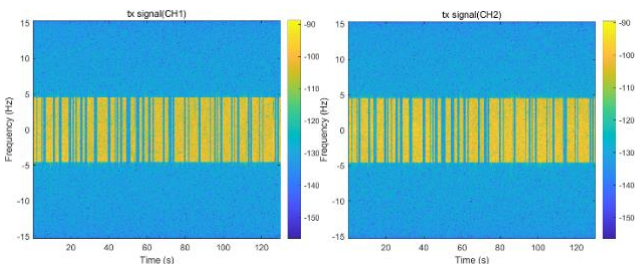


그림 2. 두 개의 안테나에서 수신된 신호의 스펙트로그램

수집된 I/Q 데이터를 MUSIC 알고리즘에 적용하여 DoA를 추정한 결과는 그림 3과 같다. 그래프는 드론이 45°에 위치했을 때 산출된 공간 스펙트럼으로, X축은 탐색 각도, Y축은 정규화된 스펙트럼의 크기를 dB 스케

일로 나타낸다. 결과에서 볼 수 있듯이, 공간 스펙트럼은 45.5°에서 단일 첨두값을 보였는데, 이는 실제 드론의 위치인 45°와 비교했을 때 약 0.5°의 추정 오차를 가지는 결과이다.

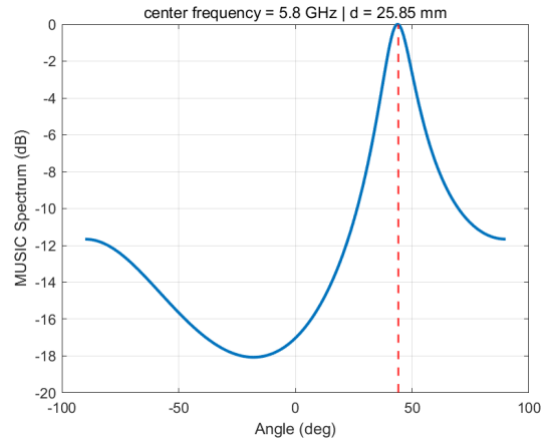


그림 3. 실제 OcuSync 신호의 DoA 추정 결과 (45° 환경)

III. 결론

본 논문에서는 SDR 플랫폼과 2채널 배열 안테나를 이용하여 드론 신호 중의 하나인 OcuSync 신호의 도래각을 추정하는 시스템을 구현하였다. MATLAB 시뮬레이션을 통해 SNR 변화에 따른 MUSIC 알고리즘의 성능을 확인하였으며, 실제 DJI사 드론을 이용한 실험을 통해 제안된 시스템이 실환경에서도 유효하게 동작함을 입증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 과제(결과물)는 교육부와 부산광역시의 재원으로 지원을 받아 수행된 부산형 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 연구결과입니다.(2025-RISE-02-002-003)

참 고 문 헌

- [1] 심준형, 황의천, 손창근, 류연승. (2023). 드론 사고 사례와 기술 동향에 따른 안티드론 대응 방안. 한국산학기술학회 논문지, 24(2), 651-659. 10.5762/KAIS.2023.24.2.651
- [2] 김한빛(Hanvit Kim), 서형욱(Hyeongwook Seo), 정현진(Hyeonjin Chung), 방지훈(Jihoon Bang), 최재훈(Jaehoon Choi), and 김선우(Sunwoo Kim). "USRP 기반 배열 안테나 테스트베드를 이용한 5.8 GHz 대역 MUSIC 실험." 한국통신학회 학술대회논문집 2021.6 (2021): 104-105.